

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Knezović

ZAGREB, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

KARAKTERIZACIJA METALNIH KOMPOZITA POMOĆU RAČUNALNE TOMOGRAFIJE

Mentor:

prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Student:

Ivan Knezović

ZAGREB, 2016.

Zahvaljujem se mentoru i voditelju rada prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu na ukazanom povjerenju, susretljivosti i savjetima pri pisanju ovog rada. Zahvalio bih se dr. sc. Mateji Šnajdar Musa na stručnim uputama i pomoći pri izradi rada. Također, zahvaljujem se dr. sc. Marku Katiću na uputstvima i savjetima pri izradi dijela završnog rada.

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zagreb, rujan 2016.

Ivan Knezović

— *Ovdje umetni tekst zadataka za završni rad!* —



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Knezović**

Mat. br.: 0035187712

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Karakterizacija metalnih kompozita pomoću računalne tomografije

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Characterisation of metal matrix composites by use of the computer tomography

Opis zadatka:

Kompoziti s metalnom matricom predstavljaju relativno novu grupu tehničkih materijala koja, zbog svojih dobrih svojstava, ima sve širu primjenu. Obzirom da svojstva tih materijala ovise o njihovoj strukturi, tj. o udjelu, rasporedu i orijentaciji ojačala, za primjenu na zahtjevnim mjestima kao što je zrakoplovstvo važno je kvalitetno karakterizirati strukturne konstituentе takvog kompozita.

U teoretskom dijelu zadatka potrebno je dati uvid u tehnologije proizvodnje metalnih kompozita, te primjere takvih materijala s područjima primjene. Potrebno je opisati mjerni uređaj za računalnu tomografiju (CT) te navesti prednosti i mane njegove primjene u karakterizaciji tehničkih materijala.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je ispitati mogućnost primjene računalne tomografije u analizi metalnog kompozita na bazi titana. Potrebno je na dostupnom CT uređaju snimiti metalni TiMg kompozit te analizirati dobivene rezultate. Strukturu istog uzorka je potrebno analizirati i na svjetlosnom mikroskopu te usporediti s rezultatima CTa. Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti zaključke o mogućnosti primjene računalne tomografije u karakterizaciji metalnih kompozita s matricom od titana.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016

2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.

3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.

3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Smojver

Sadržaj

Sadržaj	vi
Popis slika	viii
Popis tablica	x
Popis oznaka	xi
Sažetak	xii
Summary	xiii
1. Uvod	1
2. Kompoziti s metalnom matricom	2
2.1. Postupci proizvodnje MMC-a	4
2.1.1. Metalurgija praha	5
2.2. Primjena metalnih kompozita	14
3. Računalna tomografija	16
3.1. Princip rada industrijskih CT uređaja	17
3.2. Parametri snimanja CT uređajem	23
4. Eksperimentalni dio	26
4.1. Metalografija	26

4.2. Računalna tomografija	38
5. Zaključak	41
Literatura	42

Popis slika

2.1	Osnovni oblici ojačala kod MMC-a	4
2.2	Shema proizvodnje proizvoda metalurgijom praha	6
2.3	Postupci atomizacije	8
2.4	Oblici čestica i način proizvodnje	9
2.5	Određivanje uzajamnog trenja čestica	10
2.6	Postupak konvencionalnog kompaktiranja	11
2.7	Postupak hladnog izostatskog prešanja	12
2.8	Tri faze sinteriranja	13
2.9	Vruće izostatsko prešanje	13
2.10	Antena teleskopa <i>Hubble</i>	15
2.11	Podvozje aviona F-16 <i>Fighting Falcon</i>	15
3.1	Zakočno zračenje	17
3.2	Karakteristična emisija elektrona	18
3.3	Shema proizvodnje x-zraka u CT uređaju	18
3.4	Ilustracija efekta prigušenja	19
3.5	Odnos intenziteta fotona i debljine materijala	20
3.6	Maseni koeficijent prigušenja magnezija	21
3.7	Maseni koeficijent prigušenja titana	22
3.8	Shema postrojenja CT uređaja	23
3.9	Filtar za cilindrične objekte	24
4.1	Uređaj za ulijevanje	27

4.2	Ukalupljeni uzorak	27
4.3	Uređaj za brušenje	28
4.4	Uređaj za poliranje	29
4.5	Svjetlosni mikroskop	30
4.6	Poprečni presjek uzorka, uvećanje 100x	31
4.7	Uzdužni presjek uzorka, uvećanje 100x	31
4.8	Poprečni presjek uzorka, uvećanje 200x	32
4.9	Uzdužni presjek uzorka, uvećanje 200x	32
4.10	Poprečni presjek uzorka, uvećanje 500x	33
4.11	Uzdužni presjek uzorka, uvećanje 500x	33
4.12	Poprečni presjek uzorka, uvećanje 1000x	34
4.13	Uzdužni presjek uzorka, uvećanje 1000x	34
4.14	CT uređaj <i>Nikon XT H 225</i>	38
4.15	Tlocrt uzorka	39
4.16	Trodimenzijski prikaz uzorka	39
4.17	Odnos veličine čestica magnezija i njihove količine	40

Popis tablica

4.1	Parametri po fazama brušenja	28
4.2	Parametri poliranja	29
4.3	Rezultati obrađenih slika - poprečni presjek	35
4.4	Rezultati obrađenih slika - uzdužni presjek	36
4.5	Parametri snimanja CT uređajem	38

Popis oznaka

μ	linearni koeficijent prigušenja [m^{-1}]	20
ρ	gustoća [kg/m^3]	20
$I(x)$	intenzitet fotona na debljini materijala x [W/m^2]	20
I_0	početni intenzitet fotona [W/m^2]	20
x	pređena udaljenost fotona u uzorku [m]	20
CT	Computed Tomography	16
HIP	Hot Isostatic Pressing	13
MMC	Metal Matrix Composites	3

Sažetak

Tema završnog rada je ispitati mogućnosti računalne tomografije u karakterizaciji metalnih kompozita s matricom od titana. U teorijskom dijelu rada su opisani metalni kompoziti s naglaskom na njihovu proizvodnju te njihova primjena u zrakoplovstvu i ostalim područjima. Također, opisan je način rada te prednosti i mane industrijskih uređaja za računalnu tomografiju. U eksperimentalnom dijelu rada napravljena je analiza mikrostrukture titan-magnezij kompozita pomoću svjetlosnog mikroskopa i uređaja za računalnu tomografiju. Rezultati tih dviju analiza su uspoređeni te je dan zaključak o primjenjivosti računalne tomografije u karakterizaciji metalnih kompozita.

Ključne riječi: metalni kompoziti, računalna tomografija, metalografija, mikrostruktura

Summary

The theme of this thesis is examination of possibilities of computed tomography in the characterization of metal composites with titanium matrix. In the theoretical part of thesis metal matrix composites are described, with the focus on their production and their use in aviation and other industries. Furthermore, operating methods, advantages and disadvantages of industrial devices for computed tomography are also described. In the experimental part of thesis the analysis of microstructure of titanium-magnesium composite is conducted with an optical microscope and computed tomography. The results of those two analyzes are compared, and the conclusion about the applicability of computed tomography in the characterization of metal matrix composites is provided.

Keywords: metal matrix composites, computed tomography, metallography, microstructure

1 | Uvod

Kompoziti s metalnom matricom predstavljaju relativno novu skupinu materijala, sa širokim područjem primjene te time iznimno zanimljivu za proučavanje i istraživanje. Sa sposobnošću projektiranja njihovih svojstava prema zahtjevima specifične primjene i njihovoj raznovrsnosti, kompoziti s metalnom matricom su materijali kod kojih se svakodnevno dolazi do novih spoznaja te su trenutno materijali koji se ponajviše istražuju i razvijaju [1]. Također, predmet su interesa u zrakoplovstvu jer su sposobni osigurati više uporabne temperaturne granice od njihovih osnovnih materijala i mogu se oblikovati tako da se dobije povećana čvrstoća, krutost, toplinska vodljivost, abrazijska postojanost, otpornost puzanju i dimenzijska stabilnost. Njihova metalna matrica daje im metalnu prirodu s obzirom na toplinsku i električnu vodljivost, proizvodne procese te interakciju s okolišem [2]. Kako se radi o novoj skupini materijala, njihovi proizvodni postupci nisu još uvijek dovoljno istraženi. Fizikalna svojstva kompozita direktno ovise o njihovoj strukturi i sastavu, koji su upravo definirani tijekom proizvodnje. Stoga, u teorijskom dijelu ovog rada, naglasak će biti stavljen na samu proizvodnju kompozita s metalnom matricom, posebice proizvodnju metalurgijom praha jer se tim načinom proizveo uzorak za ispitivanje. Iako prvotno razvijana za potrebe u medicini, računalna tomografija trenutno pronalazi sve veću primjenu u svim granama industrije, pa tako i u zrakoplovstvu. Već 1990-tih se razmatrala primjena računalne tomografije za zrakoplovstvo, ponajviše u pogledu nerazornog ispitivanja te kontrole kvalitete dijelova [3], tako da se u eksperimentalnom dijelu rada ispituje mogućnost primjene računalne tomografije u analizi metalnog kompozita na bazi titana.

2 Kompoziti s metalnom matricom

Kompozitni materijali ili kompoziti su heterogeni materijali proizvedeni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s jasnom granicom između njih. Posljedica je dobivanje materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. U odnosu na ostale materijale kompoziti imaju određene prednosti, izrazito bitne za zrakoplovstvo, kao što su [4]:

- mala gustoća,
- velika specifična čvrstoća,
- velika specifična krutost,
- mogućnost proizvodnje složenih dijelova,
- jednostavno i jeftino održavanje,
- otpornost na koroziju i
- dulji vijek trajanja.

Svi kompoziti se u osnovi sastoje od matrice i ojačala, odnosno druge faze. Njihova svojstva su stoga određena sljedećim faktorima:

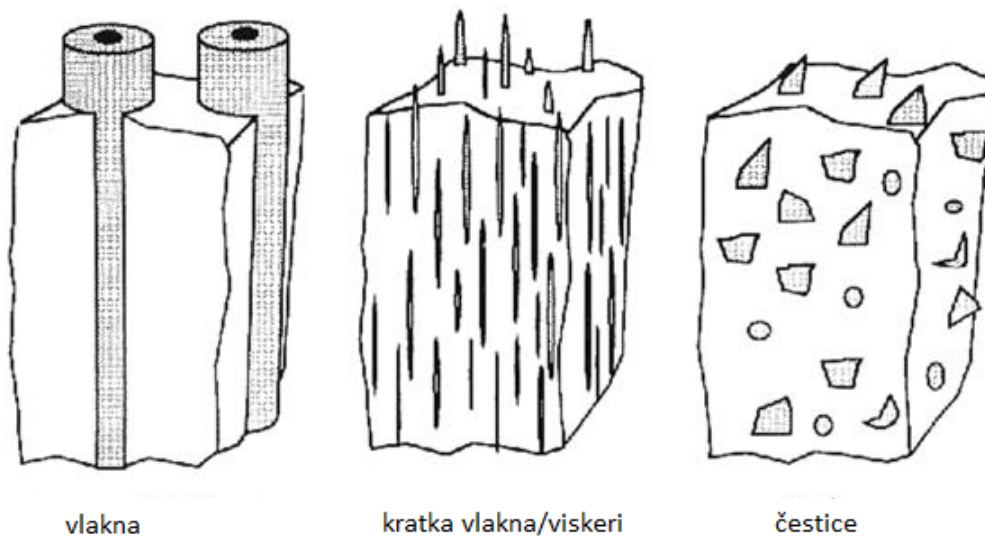
- svojstvima matrice i ojačala,
- veličini i rasporedu konstituenata,
- volumnom udjelu konstituenata te

- prirodi i jakosti veze među konstituentima.

S obzirom na materijal matrice kompozite dijelimo na tri osnovne grupe: kompozite s polimernom, keramičkom i metalnom matricom. Kompoziti s polimernom matricom trenutno predstavljaju najzastupljeniju skupinu. Kompoziti s metalnom matricom, zbog skuplje izrade i kasnije obrade, su imali sporiji razvoj u odnosu na polimerne. Međutim, s današnjim razvojem tehnologije proizvodnje lakih metala, zastupljenost kompozita s metalnom matricom se povećava. Kod kompozita s metalnom matricom matična faza je uglavnom legura, rijetko čisti metal, a odabir materijala matrice određuje se u ovisnosti o namjeravanoj primjeni kompozita. Najčešći materijali matrice koji se koriste pri izradi MMC-a (eng. *Metal Matrix Composites* -MMC) su aluminij, titan, magnezij, bakar i superlegure. Titan se koristi kao materijal matrice zbog otpornosti na koroziju te dobre specifične čvrstoće koju zadržava na visokim temperaturama za razliku od aluminija. Taj uvjet je počeo dolaziti do izražaja pri prelasku zrakoplova na nadzvučne brzine, odnosno brzine pri kojima dolazi do povišenja temperature. Ojačala se odabiru ovisno o željenim karakteristikama produkta, no najčešći zahtjevi koje ojačalo mora ispuniti su:

- niska gustoća,
- kemijska i mehanička kompatibilnost s materijalom matrice,
- toplinska stabilnost,
- dobra tehnološkičnost,
- velika krutost i čvrstoća te
- ekonomičnost.

Ojačalo za kompozite s metalnom matricom se najčešće sastoji od ugljičnih, metalnih ili keramičkih dodataka. Osnovni oblici ojačala su kontinuirana vlakna, kratka vlakna odnosno viskeri te čestice, prikazani na slici [2.1](#).



Slika 2.1: Osnovni oblici ojačala kod MMC-a [1]

2.1. Postupci proizvodnje MMC-a

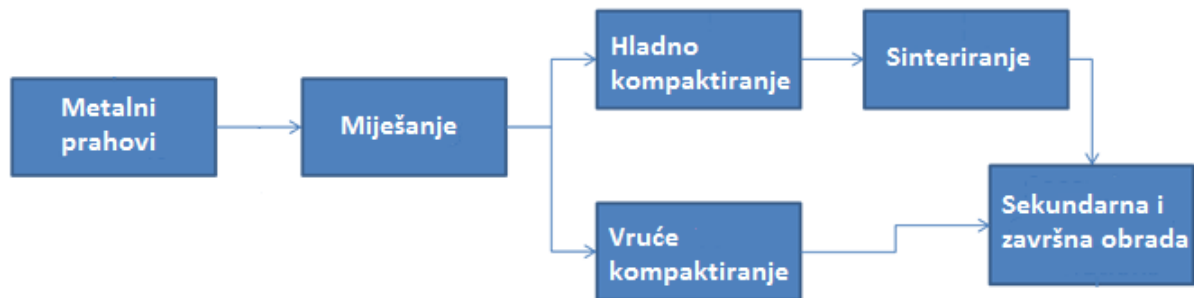
Kompoziti s metalnom matricom u pravilu su skuplji od konvencionalnih materijala koje zamjenjuju, a tome najviše doprinosi njihova izrada i oblikovanje, no sa serijskom proizvodnjom cijena se bitno snižava. Proces proizvodnje dijeli se na primarne i sekundarne grupe. U primarnom procesu se sintetiziraju kompoziti od materijala matrice i ojačala, odnosno ugrađuje se ojačalo u matricu u željenoj količini i na željena mjesta. Tijekom sekundarnog procesa dolazi do prerade primarnog kompozita u konačni dio, što uključuje postupke oblikovanja, spajanja i završne obrade. Izbor postupka za proizvodnju kompozita nije uvijek trivijalan, potrebno je poznavati moguće reakcije između matrica i ojačala. Velik broj kombinacija matrica-ojačala nisu uopće kompatibilni u smislu prijanjanja i njihove se površine moraju dodatno prilagođavati, dok se kod nekih kombinacija povezanost matrice i ojačala mora pojačati. Također, ako su konstituenti reaktivni, moramo izbjegavati prekomjernu aktivnost na granicama, jer i to može oslabiti svojstva materijala. Postupci proizvodnje su brojni i raznoliki te prilikom njihovog odabira se moraju znati mehanička i kemijska svojstva ojačala i matrice, također i dužina, veličina te željeni razmještaj vlakana odnosno čestica i sva ostala svojstva koja kompozit treba posjedovati.

Postupke proizvodnje najčešće dijelimo na [5]:

- Postupci u tekućem stanju:
 - lijevanje miješanjem,
 - oblikovanje u poluskrućenom stanju
 - infiltracija rastaljenog metala (spontana ili prisilna),
 - lijevanje (kokilno, tlačno, centrifugalno te lijevanje tiskanjem),
 - brzo skrućivanje i
 - oblikovanje naštrcavanjem.
- Postupci u čvrstom stanju:
 - difuzijsko spajanje i
 - metalurgija praha.
- Postupci prevlačenja:
 - prevlačenje naštrcavanjem,
 - taloženje iz parne faze i
 - elektrolitičko prevlačenje.

2.1.1. Metalurgija praha

Metalurgija praha (eng. *Powder metallurgy*) je tehnologija proizvodnje kompozita od metalnih prahova u nizu postupaka. Ti postupci uključuju miješanje metalnih prahova ili prahova legura s dodacima, zatim kompaktiranje u kalupu čime se dobiva određena gustoća čestica te naposljetku sinteriranje, odnosno zagrijavanje komada malo ispod temperature tališta kako bi se dodatno povezale komponente. U slučaju potrebe, komad se može dodatno, odnosno sekundarno obraditi kako bi se dobila željena svojstva. Postoji i mogućnost spajanja kompaktiranja i sinteriranja u jedan postupak, što nazivamo vruće prešanje. Shema postupka je vidljiva na slici 2.2.



Slika 2.2: Shema proizvodnje proizvoda metalurgijom praha [6]

Proizvodi dobiveni metalurgijom praha imaju jednaka ili čak poboljšana svojstva u odnosu na one dobivene tradicionalnim postupcima, a zbog velikog broja prednosti nad ostalim postupcima proizvodnje, metalurgija praha sve više dobiva na značaju. Prednosti metalurgije praha uključuju [7]:

- mogućnost automatizacije procesa čime se postiže velika produktivnost,
- mogućnost proizvodnje u konačnom obliku ili blisko konačnom obliku bez potrebe za sekundarnom obradom,
- mogućnost izrade dijelova s kontroliranom poroznošću kada nam ona treba,
- mogućnost izrade dijelova s povećanim udjelom ojačanja u odnosu na postupke u tekućem stanju,
- točnije dimenzije dijelova u odnosu na većinu postupaka lijevanja,
- mogućnost izrade materijala od komponenata koji nisu kompatibilni u postupcima lijevanja i
- jednolika sitnozrnata mikrostruktura.

Kao nedostaci metalurgije praha ističu se:

- visoka cijena potrebne opreme,
- visoka cijena metalnih prahova,
- poteškoće skladištenja prahova metala i
- ograničeni oblici dijelova koji se mogu izraditi.

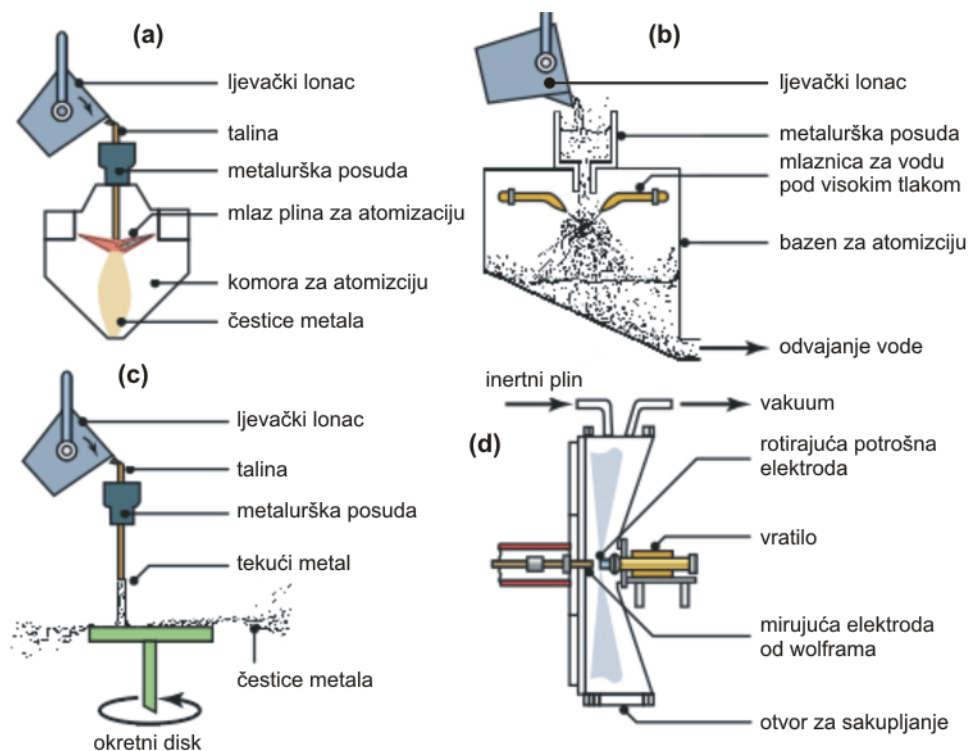
Proizvodnja metalnih prahova

Prvi korak u procesu metalurgije praha je dobivanje metalnog praha. Postoji mnogo načina za dobivanje metalnih prahova, no mogu se svesti na četiri vrste procesa proizvodnje:

- mehanički,
- elektrolitički,
- kemijski i
- atomizacija.

Mehanička proizvodnja praha podrazumijeva usitnjavanje polaznog materijala djelovanjem vanjskih sila čime se dobivaju prahovi nepravilnog oblika. Osnovni načini mehaničkog usitnjavanja su udarno djelovanje, trenje, smicanje i tlačenje, s tim da se često koriste i kombinacije ova četiri načina. Ova metoda se koristi kod krhkih i reaktivnih materijala, često nakon obrade odvajanjem čestica kada ostaje velika količina odvojenih čestica koje se mogu lako usitniti. Elektroliza je jedan od načina dobivanja prahova pri čemu se odabirom točnih kemijskih i fizikalnih uvjeta, mogu dobiti gotovo svi tehnološko zanimljivi metali. Otapanjem anode pod utjecajem napona se talog metala nakuplja na katodi u obliku grudica ili pahuljica koje se lako poslije usitnjavaju u prah. Ovim načinom se dobivaju izrazito čisti prahovi odličnih svojstava, no zbog potrebe kontrole mnogih varijabli, ovaj proces je znatno skuplji od ostalih. Kemijski procesi uključuju dobivanje praha redukcijom metalnih smjesa, reakcijskom sintezom, taloženjem otopina soli metala, kombinacijom isparavanja i kondenzacije te hidrid-dehidrid postupkom. Hidrid-dehidrid postupak je trenutno najzastupljeniji način dobivanja prahova titana i njegovih legura, jer omogućava dobivanje prahova od odvojenih

čestica nakon strojne obrade što je bitno jer su titan i njegove legure relativno skupi materijali. Postupak možemo podijeliti na dva dijela, prvo je zasićenje metala vodikom kako bi se dobio krhki materijal koji se potom usitnjava u prah mljevenjem. Drugi dio obuhvaća razlaganje hidrida zagrijavanjem čime se dobiva prah polaznog metala [8]. Atomizacija se odvija tako da se rastaljeni metal razdvaja na male kapljice i brzo skrućuje prije dodira s drugim kapljicama ili podlogom. Razlikujemo više izvedbi, odnosno načina kako se rastaljeni metal razdvaja na kapljice, tako atomizacija može biti plinska, vodena, centrifugalna s rotirajućim diskom i centrifugalna s rotirajućom potrošnom elektrodom, prikazanih na slici 2.3. Centrifugalna atomizacija s rotirajućom elektrodom je razvijena primarno za dobivanje titana visoko čistoće no koristi se još i za dobivanje prahova superlegura i visokolegiranih ili reaktivnih metala.



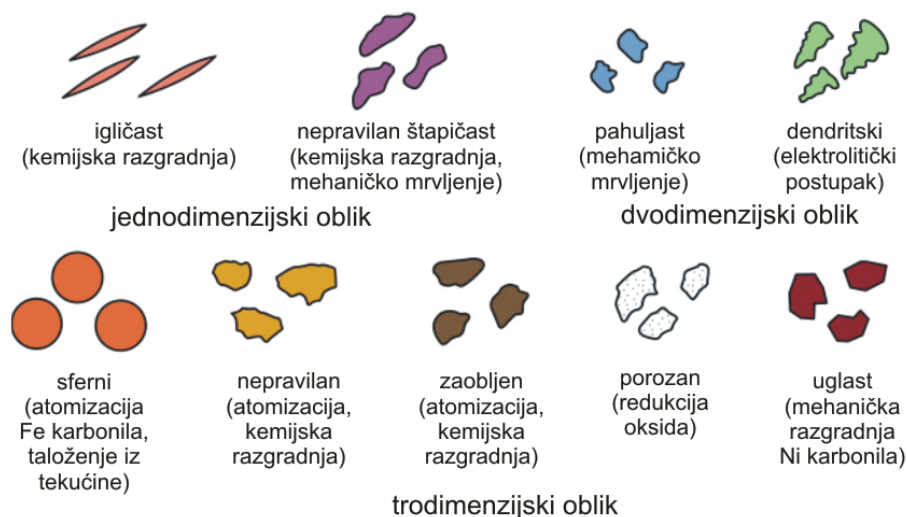
Slika 2.3: Postupci atomizacije: (a) plinom; (b) vodom; (c) centrifugalna s rotirajućim diskom; (d) rotirajućom potrošnom elektrodom [9]

Karakteristike praha

Daljnji postupci proizvodnje dijelova metalurgijom praha, kompaktiranje i sinteriranje te svojstva izrađenih dijelova uvelike ovise o karakteristikama dobivenog praha:

- veličini čestica,
- obliku čestica,
- kemijskom sastavu,
- međučestičnom trenju i
- gustoći praha.

O veličini čestica praha ovisi ujednačenost smjese pri miješanju praha ili smjese prahova. Što su čestice manjih dimenzija, veća je mogućnost dobivanja ujednačenije smjese. Također, o dimenzijama čestica ovisi tečenje materijala te sposobnost sinteriranja, jer kod manjih dimenzija čestica, veći je broj kontaktnih površina. Određivanje dimenzija čestica, pogotovo onih s nepravilnim oblikom, nije jednostavno te se u pravilu ne radi. Oblik čestica utječe na svojstva praha, odnosno na tečenje, stlačivost i mogućnost sinteriranja, ali i utječe na svojstva konačnog proizvoda. Oblik čestica ovisi o načinu proizvodnje praha. Na slici 2.4 se vidi osnovna podjela oblika čestica praha i njihov način proizvodnje.

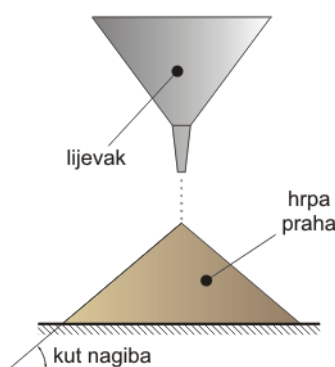


Slika 2.4: Oblici čestica i način proizvodnje [7]

Kemijski sastav odnosno mikrostruktura je ključan parametar koji utječe na svojstva kompozita. Određuje se raznim kemijskim metodama i uključuje procjenu udjela nečistoća, odnosno neželjenih elementa koji smanjuju mehaničke karakteristike. Uobičajeno se prahovi dijele na tri skupine:

- elementarni (prah jednog elementa, kemijska analiza utvrđuje koncentraciju nečistoća),
- smjese (kombinacija elementarnih prahova) i
- predlegirani prahovi (prah dobiven od prethodno legiranih materijala).

O međučestičnom trenju uvelike ovisi sposobnost tečenja praha, odnosno brzina kojom prah popunjava kalup. Određuje se pomoću kuta nagiba hrpe praha pri izlijevanju kroz uski lijevak što je vidljivo na slici 2.5 .



Slika 2.5: Određivanje uzajamnog trenja čestica [9]

Međučestično trenje je veće što su veći kutevi nagiba, a općenito vrijedi da manje čestice tvore veće kuteve nagiba, odnosno imaju veće trenje među česticama. Također, čestice sfernog oblika imaju najmanje trenje među česticama i što je veće odstupanje od sfernog oblika, veće je i trenje među česticama. Gustoća je jedno od najvažnijih svojstava praha jer direktno utječe na sva njegova tehnološka svojstva, sposobnost tečenja, sabijanja i sinteriranja. Pri tome treba razlikovati teorijsku gustoću odnosno gustoću materijala od kojeg se sastoji prah i prividnu gustoću, odnosno gustoću čestica praha nasutih na neki bruto volumen. Bruto volumen je uvijek veći od neto volumena zbog prisutnosti pora u prahu. Faktor pakiranja je bitna karakteristika prahova vezana za gustoću, koja označava omjer prividne gustoće i teorijske gustoće i uvijek je manji od 1. Poroznost je također vezana za gustoću praha, ali ona

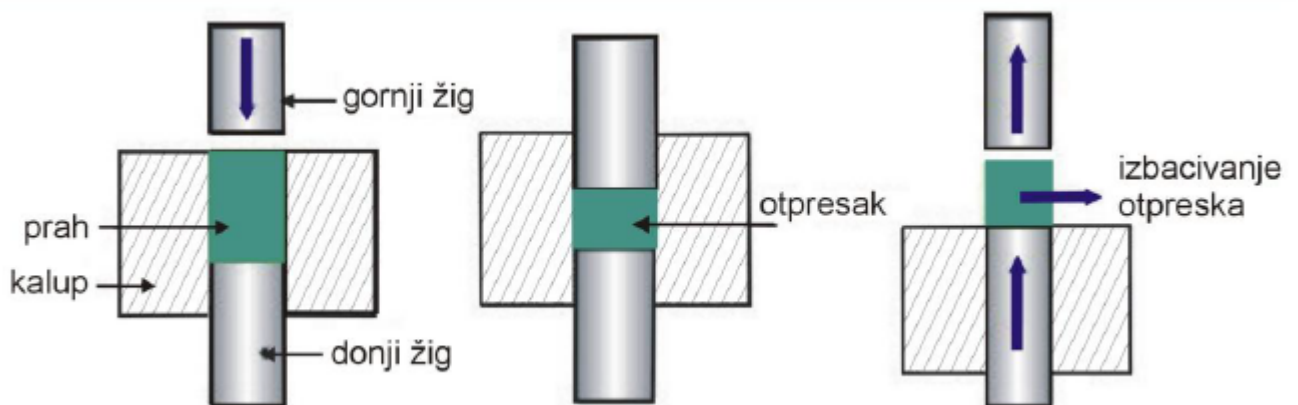
označava omjer volumena pora odnosno praznog prostora i bruto volumena. Poroznost materijala ovisi o početnoj veličini čestica, pri čemu manje čestice daju manje dimenzije pora, ali njihov veći broj, dok veće čestice daju manju količinu pora, ali većih dimenzija. Poroznost materijala nije lako utvrditi zbog postojanja pora u samim česticama praha.

Kompaktiranje

Nakon miješanja praha kojemu je zadaća priprema ravnomjerne raspodjele veličina čestica čime se osigurava što bolje sjedinjavanje praha te nakon dodavanja lubrikanata koji smanjuju trenje između praha i kalupa, slijedi proces kompaktiranja. Zadaća kompaktiranja je:

- konsolidacija praha u konačni oblik te u željene dimenzije,
- dovesti produkt do željenog stupnja i vrste poroznosti te
- dovesti produkt do željene čvrstoće.

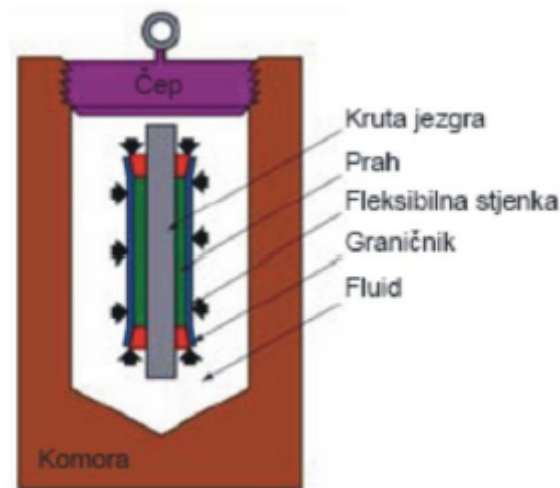
Konvencionalno kompaktiranje je najčešća metoda kompaktiranja koja podrazumijeva prešanje praha s jedne ili s dvije strane. Kalup se najprije napuni prahom, zatim slijedi prešanje klipom ili klipovima te se naposljetku komad izbacuje, kao na slici 2.6. Iako vrlo jednostavna metoda, rijetko se koristi kod složenijih oblika zbog nemogućnosti ravnomjerne raspodjele gustoće otpreska.



Slika 2.6: Postupak konvencionalnog kompaktiranja [10]

Hladno izostatsko prešanje omogućava složene oblike i ravnomjernu raspodjelu gustoće produkta u svim smjerovima jer se prešanje odvija u fleksibilnoj komori koju jednolično tlači

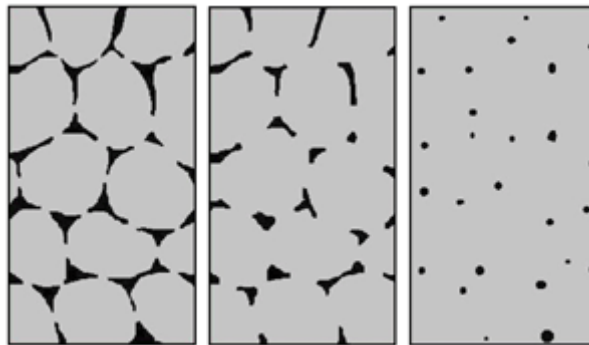
fluid, kao što je prikazano na slici 2.7. Hladno izostatsko prešanje se sve više koristi jer pored ravnomjerne raspodjele, omogućava i puno veće gustoće otpresaka od konvencionalnih načina prešanja. Također, dobivaju se veće čvrstoće otpreska i generalno bolja mehanička svojstva krajnjeg produkta.



Slika 2.7: Postupak hladnog izostatskog prešanja [10]

Sinteriranje

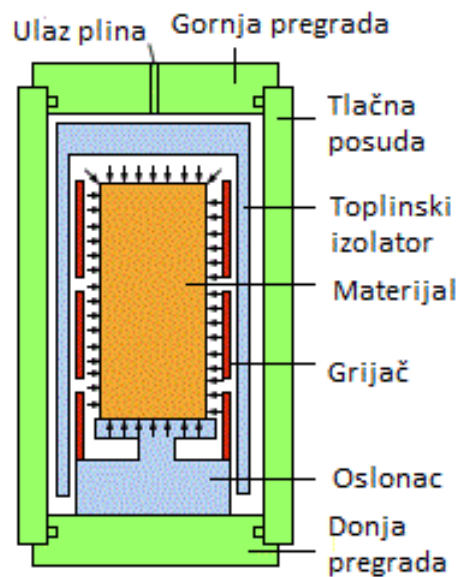
Sinteriranje je toplinska obrada kompaktiranog dijela na temperaturi nižoj od temperature taljenja glavnog elementa čime se čestice povezuju te se time dobiva veća čvrstoća produkta i gustoća blizu teoretske gustoće elementa. Na visokim temperaturama atomi se kretanjem povezuju, odnosno događa se zavarivanje površina čestica i mijenjanje oblika čestica. Sinteriranje se može podijeliti u tri faze, nastajanje i rast kontakta, brzo skupljanje i približavanje konačnoj gustoći, kao što se vidi na slici 2.8. Kako je sinteriranje toplinski aktivirani proces, funkcija je temperature i vremena, što je viša temperatura, vrijeme za postizanje zadovoljavajućeg produkta je kraće. Također, što su čestice manje te što je veća gustoća prije sinteriranja, odnosno veća površina dodira čestica, sinteriranje kraće traje. Atmosfera za sinteriranje mora biti odgovarajuća kako bi se izbjegle neželjene reakcije dijela koji se sinterira te kako bi se omogućila odgovarajuća temperatura i tlak za sinteriranje.



Slika 2.8: Tri faze sinteriranja [11]

Vruće izostatsko prešanje

Vruće izostatsko prešanje (eng. *Hot Isostatic Pressing* - HIP) objedinjava kompaktiranje i sinteriranje u jedan postupak. Njime je moguće postići teorijsku gustoću materijala. Sličan je postupku hladnog izostatskog prešanja, no razlikuje se odvijanjem na temperaturi sintiranja, slika 2.9.



Slika 2.9: Vruće izostatsko prešanje [12]

Provodi se u pet faza:

1. otplinjavanje i evakuiranje radne kapsule

2. punjenje fluidom (najčešće plin argon) te postizanje željenog tlaka
3. zagrijavanje do temperature sinteriranja
4. držanje na postignutom tlaku i temperaturi
5. ohlađivanje.

Iako ima izražene prednosti pred ostalim postupcima, zbog skupe opreme, niske proizvodnosti i određenih zahtjeva proizvodnje provodi se samo na dijelovima koji zahtijevaju najvišu kvalitetu koja se teško dobiva i tradicionalnim postupcima. Uobičajeno, to podrazumijeva dijelove od titana. Osim kompaktiranja zajedno sa sinteriranjem te vrućeg izostatskog prešanja, postupci kojima dobivamo izratke od metalnog praha uključuju:

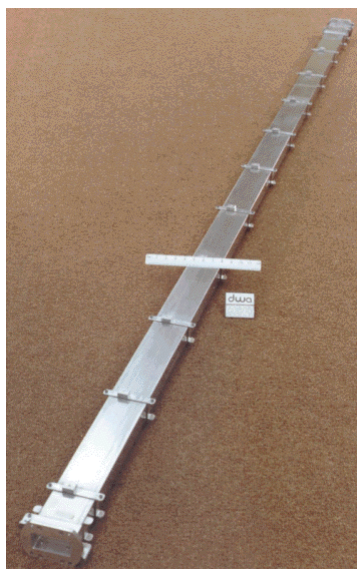
- ekstrudiranje,
- injekcijsko prešanje praha,
- kompaktiranje valjanjem i
- kovanje praha.

Postupke odabiremo u ovisnosti o materijalu praha te o obliku i zadaći krajnjeg proizvoda.

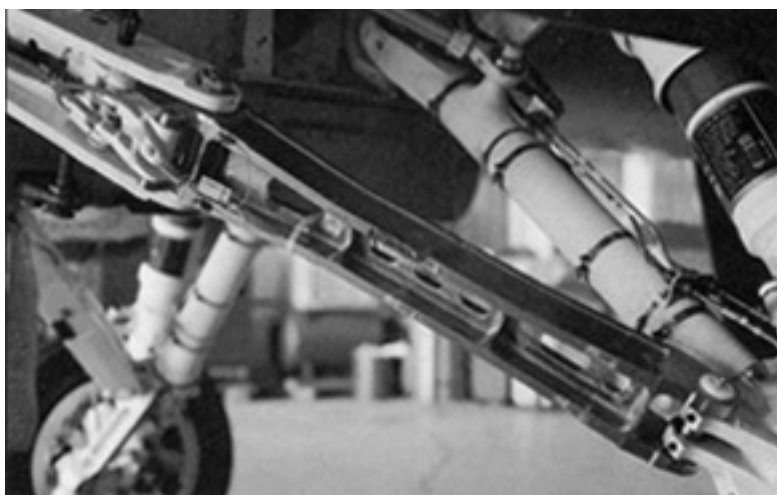
2.2. Primjena metalnih kompozita

Unatoč svojstvima, zbog visoke cijene metalni kompoziti su u prošlosti bili ograničeni samo na područje vojne, zrakoplovne i svemirske tehnike. Najpoznatiji primjeri primjene u svemirskoj tehnici su grede u obliku cijevi načinjene od aluminiya ojačanog borovim vlaknima u srednjem dijelu trupa *Space Shuttle*-a te antena teleskopa *Hubble* od aluminiya ojačanog ugljičnim vlaknima koja se vidi na slici 2.10.

Naravno, razvitkom metoda proizvodnje, odnosno snižavanjem cijene, primjena metalnih kompozita se raširila na industriju sporta, medicinu, ali ponajviše na automobilsku industriju, gdje nalazimo dijelove napravljene od metalnih kompozita s aluminijskom ili magnezijevom matricom: klipove, klipnjače, opruge, diskove kočnica i kardansko vratilo. U zrakoplovstvu se kompoziti s metalnom matricom koriste za okvire, rebra, spojne elemente i dijelove oplata. Najpoznatiji primjer u zrakoplovstvu je korištenje titana ojačanog silicij-ugljik vlaknima za podvozje aviona F-16 *Fighting Falcon*, koje je prikazano na slici 2.11.



Slika 2.10: Antena teleskopa *Hubble* [13]



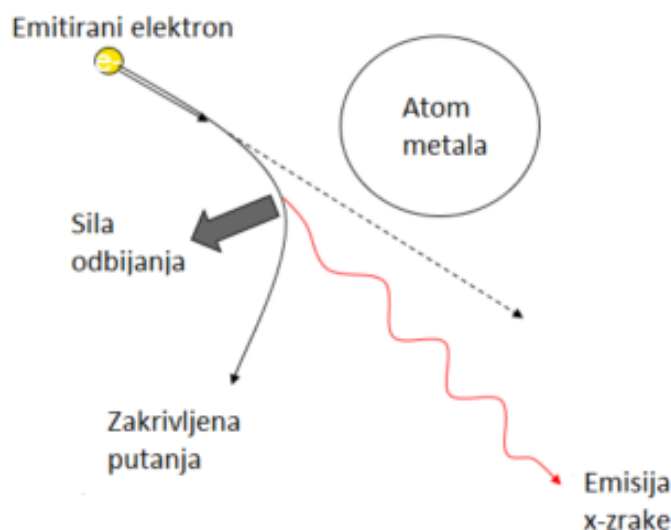
Slika 2.11: Podvozje aviona F-16 *Fighting Falcon* [14]

3 Računalna tomografija

Računalna tomografija (eng. *Computed Tomography* - CT) je proces kojim se dobiva tro-dimenzionalni prikaz objekta snimanja, što podrazumijeva kako vanjski oblik objekta, tako i njegovu unutarnju strukturu. To je napredna metoda radiografije, s kojom dijeli osnovne postavke, nastala zahvaljujući razvoju računala koji je omogućio da se iz mnoštva radiografskih snimaka dođe do rekonstruiranja trodimenzionalnog prikaza objekta snimanja. Iako prvotno korištena u medicinske svrhe, daljnjim razvojem računala, odnosno konstantnim povećanjem brzina snimanja, smanjivanjem cijene i jednostavnim računalnim sučeljem, računalna tomografija svoju primjenu je našla u mnogim granama industrije kao što su biologija, geologija, elektronika i strojarstvo. S računalnom tomografijom u području strojarstva se može vizualizirati nedostupna unutarnja struktura, pronalaziti pukotine nastale pri eksploataciji, mjeriti debljinu stijenki, precizno mjeriti vanjske i unutarnje dimenzije dijelova bez razaranja i općenito obavljati kontrolu kvalitete dijelova. Nema nikakvih zahtjeva na pripremu uzorka prije ispitivanja te nema ograničenja u pogledu oblika uzorka ili kvalitete njegove površine. Posljednjih godina se sve više radi na povezivanju CAD modela korištenih pri konstruiranju dijelova i CT snimci poslije izrade kako bi se uspoređivala točnost i kvaliteta izrade. Sa sve većim zahtjevima na zrakoplovne dijelove, procesi i materijali u proizvodnji se unapređuju, pa se tako i u zrakoplovstvu tradicionalna 2D radiografija i ultrazvuk sve više zamjenjuju računalnom tomografijom pri kontroli kvalitete dijelova.

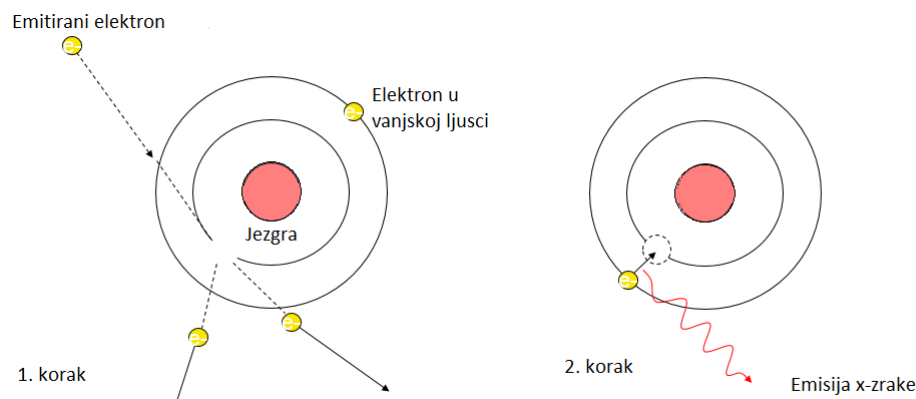
3.1. Princip rada industrijskih CT uređaja

X-zrake u CT uređaju se dobivaju ubrzavanjem snopa elektrona koji pogađaju metal te se zaustave. Kao katoda koja emitira elektrone se najčešće koristi volframova nit, koja se zagrijava prolaskom električne struje kroz nju. Kada se dovoljno zagrije, nit sjaji i odašilje elektrone. Koristeći razliku potencijala između anode i katode, odnosno električni napon, elektroni se ubrzavaju od katode prema anodi i prolaze kroz otvor u sredini anode brzinom do 80% brzine svjetlosti. Leće zatim usmjeravaju elektrone na vrlo malu površinu metala, gdje dolazi do interakcije emitiranih elektrona s atomima metala. Pri tome se više od 99% kinetičke energije emitiranih elektrona pretvara u toplinu, a ostatak se pretvara u energiju x-zraka. Dva su načina kojima dolazi do stvaranja x-zraka prilikom interakcije elektrona s atomima metala, većinom je to zakočno zračenje (njem. *Bremsstrahlung*; eng. *Braking Radiation*), a manjim dijelom karakteristična emisija elektrona (eng. *Characteristic emission*) [15]. Zakočno zračenje se događa kada se neka nabijena čestica usporava ili ubrzava. U ovom slučaju, elektroni u atomu metala odbijaju emitirani elektron koji dođe do njih te se njegova putanja zakrivljuje i elektron se usporava ili ubrzava. Pri tome dolazi do emisije x-zraka čija energija ovisi o tome koliko je bilo ubrzanje ili usporavanje elektrona. Što elektron dođe bliže atomu, odbijanje je snažnije i energija je zbog toga veća. Zakočno zračenje je prikazano na slici 3.1.



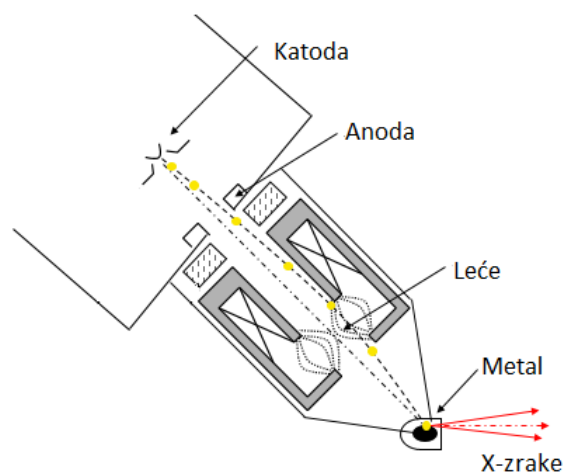
Slika 3.1: Zakočno zračenje [15]

Karakterističnom emisijom se dobiva točno određena energija x-zrake ovisna o metalu s kojim emitirani elektroni dolaze u interakciju. Kada emitirani elektroni priđu atomu metala, postoji mogućnost da izbace elektrone koji okružuju jezgru atoma iz nekih od unutarnjih ljuski elektronskog omotača. Ako se to dogodi, atom postaje nestabilan te kako bi se stabilizirao elektroni iz vanjskih ljuski prelaze na upražnjeno mjesto u unutarnjoj ljusci. Pri tom prelasku elektrona iz vanjske u unutarnju ljusku, emitira se energija, karakteristična za taj metal, u obliku x-zrake. Ovim načinom, prikazanim na slici 3.2, se dobiva 5-15% emisije x-zraka.



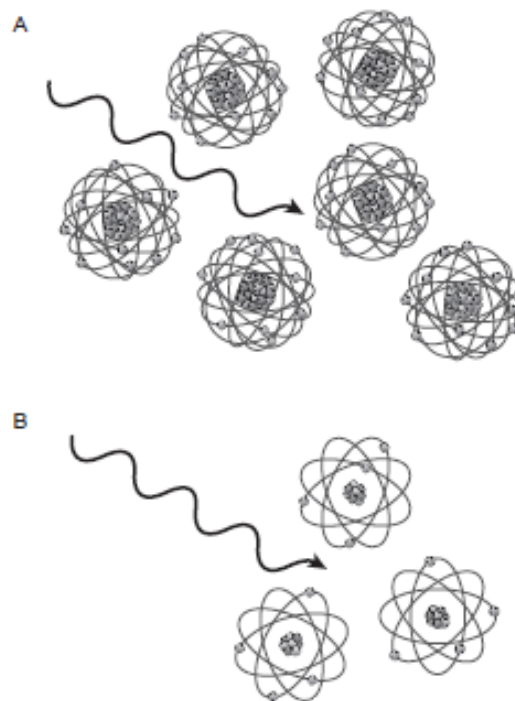
Slika 3.2: Karakteristična emisija elektrona [15]

Cjelokupni postupak stvaranja x-zraka u CT uređaju prikazan je na slici 3.3.



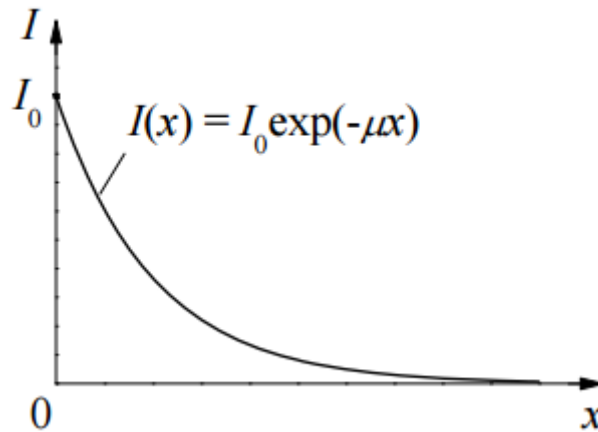
Slika 3.3: Shema proizvodnje x-zraka u CT uređaju [15]

Uzorak koji se snima na CT uređaju prikazan je u nijansama sive boje, a stvaranje tih nijansi počiva na osnovnim principima radijacije. X-zraka se sastoji od fotona koji su nositelji energije. Fotoni kroz uzorak mogu proći ili se raspršiti, odnosno preusmjeriti. Također, moguće je i da uzorak dijelom apsorbira fotone, u ovisnosti o jačini x-zraka i strukturi materijala. Stupanj smanjenja jakosti x-zraka koji prolaze kroz uzorak nazivamo prigušenje ili atenuacija. Količina fotona koji prođu kroz uzorak određuje nijansu sive boje na CT slici. Dogovorom, fotoni koji prođu kroz uzorak neometano, odnosno kada nema prigušenja, CT uređaj zabilježava bijelom bojom. Kada uzorak potpuno rasprši ili apsorbira x-zraku, ona se ne može detektirati pa je na CT slici to područje potpuno crno. Područja srednjeg prigušenja su prikazana nijansama sive. Prigušenje ovisi o energiji pojedinih fotona te o debljini, gustoći i atomskom broju materijala uzorka, jer što je više atoma na putu te što je više protona, neutrona i elektrona u atomu te što je dulji put, veća je vjerojatnost da fotoni ne prođu kroz materijal [16]. Ilustracija tog efekta se vidi na slici 3.4 gdje je materijal A gušći, s većim atomskim brojem i deblji, te je time prigušenje veće od materijala B.



Slika 3.4: Ilustracija efekta prigušenja za dva različita materijala A i B [16]

Prigušenje pojedinog materijala se najčešće prikazuje grafom koji pokazuje odnos intenziteta fotona i debljine materijala, prikazanog na slici 3.5.



Slika 3.5: Odnos intenziteta fotona i debljine materijala [17]

Krivulju na slici 3.5 opisuje jednačina:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.1)$$

gdje su:

- $I(x)$ - intenzitet fotona na debljini materijala x ,
- I_0 - početni intenzitet fotona,
- μ - linearni koeficijent prigušenja i
- x - pređena udaljenost fotona u uzorku.

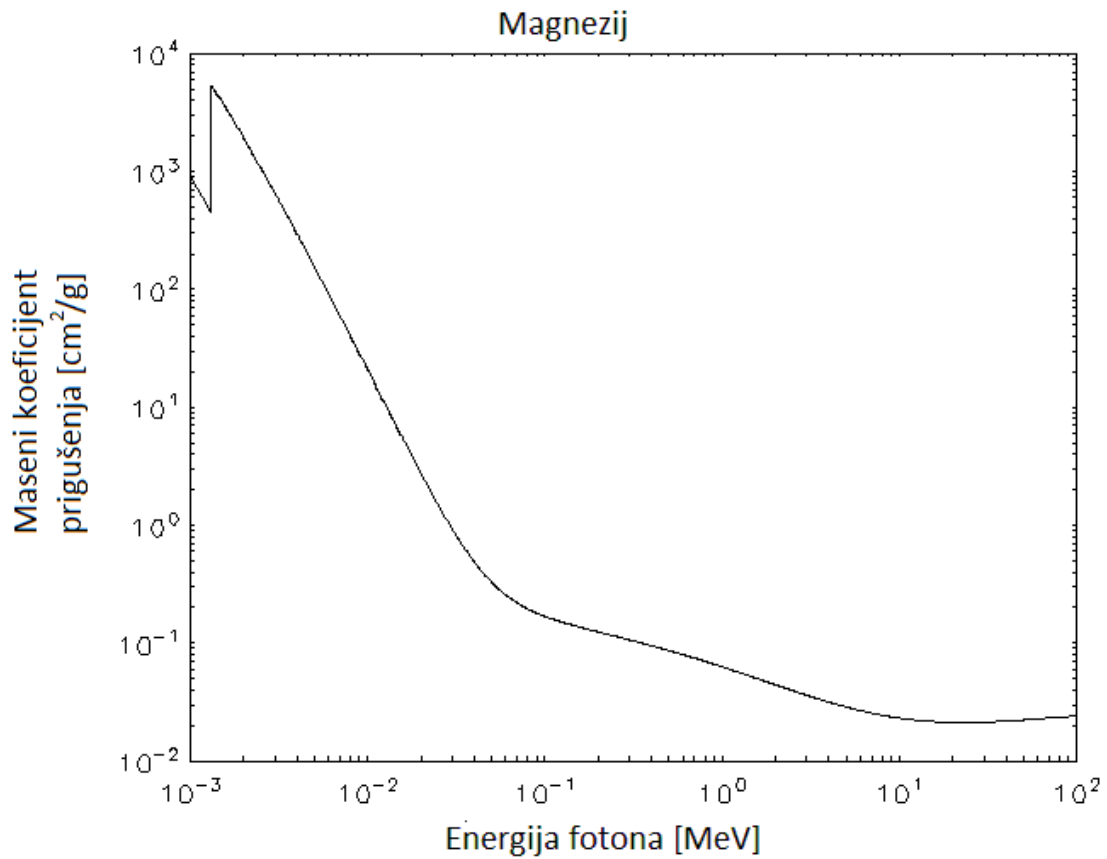
Linearni koeficijent prigušenja pokazuje koliki se dio x-zrake rasprši ili apsorbira u nekom materijalu po jedinici duljine. Ovaj koeficijent je različit za različite materijale, različite gustoće materijala i različite energije fotona. Ponekad je teško pronaći podatke u literaturi o linearnom koeficijentu prigušenja jer on ovisi o gustoći materijala koja može biti promjenjiva. Naime, prigušenje uvelike ovisi o agregatnom stanju materijala. Zbog toga se definira maseni koeficijent prigušenja, kao omjer linearnog koeficijenta prigušenja i gustoće materijala, pa jednačina (3.1) postaje:

$$I(x) = I_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} x} \quad (3.2)$$

gdje je:

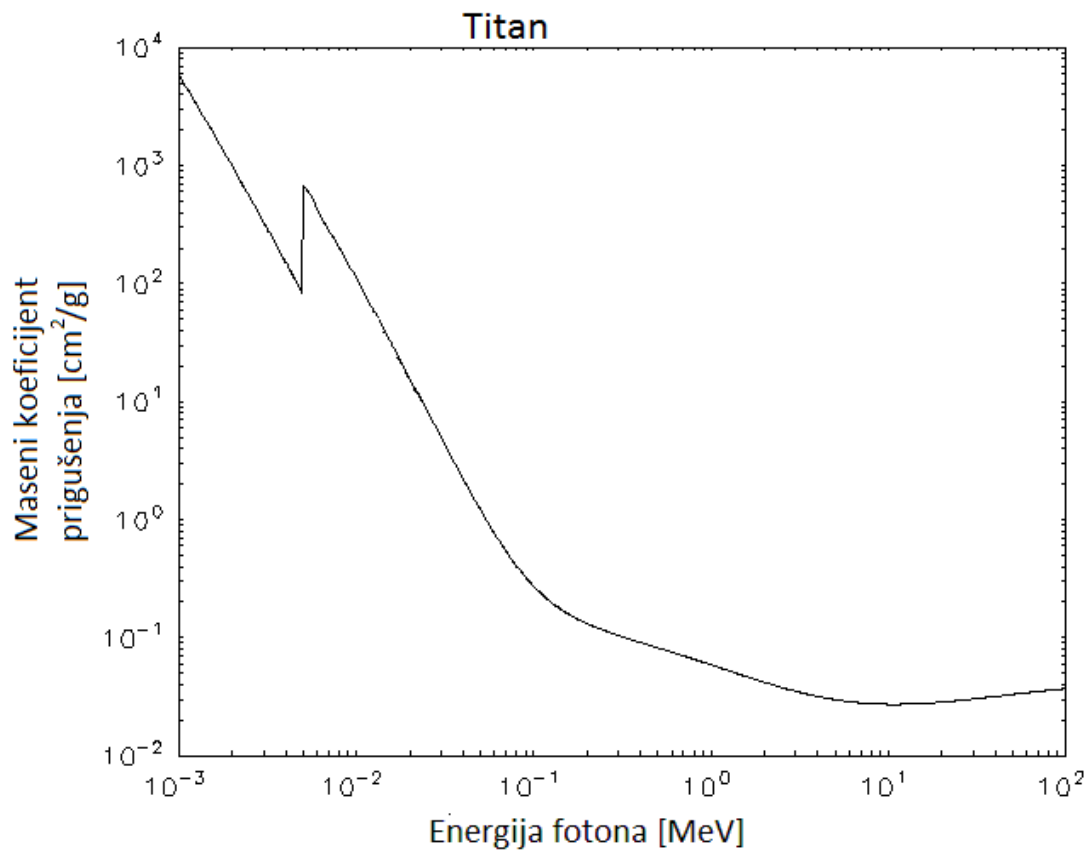
- ρ - gustoća materijala.

Krivulju masenog koeficijenta prigušenja u ovisnosti o energiji fotona za magnezij prikazuje slika 3.6, a za titan slika 3.7.



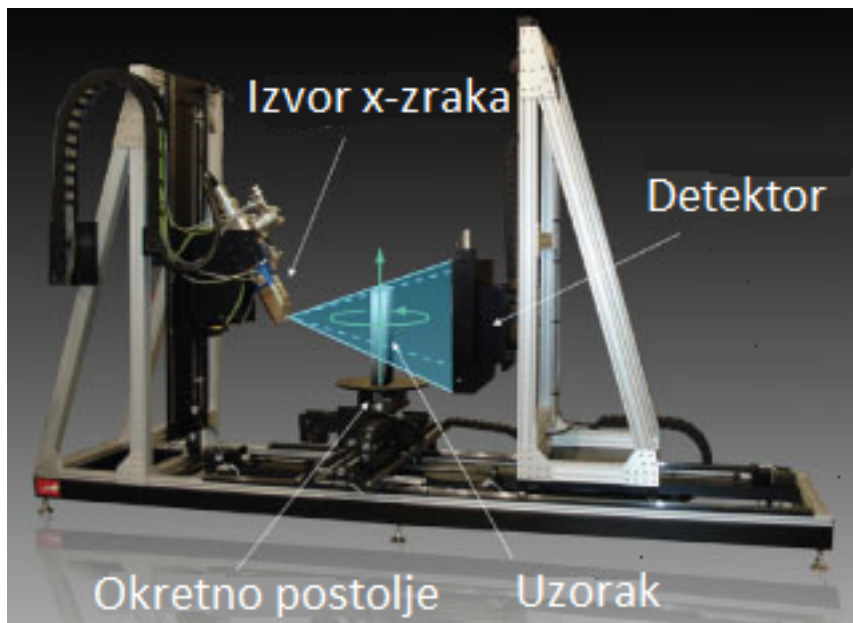
Slika 3.6: Maseni koeficijent prigušenja magnezija [18]

Uz različite masene koeficijente prigušenja, CT uređaj lako razlikuje i detektira titan i magnezij. Problemi kod detektiranja često se pokazuju kod različitih faza istog materijala, na primjer čelika.



Slika 3.7: Maseni koeficijent prigušenja titana [18]

Nakon prolaska kroz uzorak, x-zrake dolaze do detektora. Detektor apsorbira x-zrake i re-emitira ih kao slabo svijetlo. Fotodiode zatim taj svjetlosni signal pretvaraju u električni i šalju računalu na obradu, odakle se dobiva slika uzorka iz jednog smjera. Kvaliteta slike ovisi o kvaliteti detektora, odnosno broju piksela detektora. Računalo dijeli uzorak na voksele, male trodimenzionalne elemente, odnosno trodimenzionalne piksele te se svaki voksel uzorka projicira na jedan piksel detektora. Kako bi dobili trodimenzionalnu strukturu, uzorak se snima iz više smjerova, odnosno više projekcija, čime računalo dobiva detaljne informacije o uzorku i svakom njegovom vokselu te pomoću algoritma konstruira trodimenzionalni digitalni objekt [19]. Shema čitavog postrojenja je prikazana na slici 3.8.

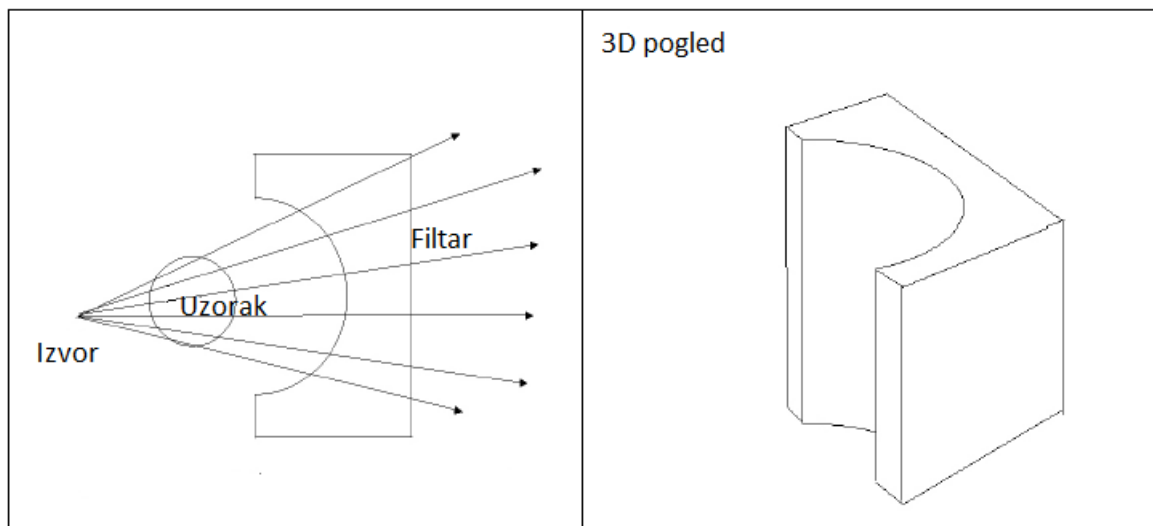


Slika 3.8: Shema postrojenja CT uređaja [20]

3.2. Parametri snimanja CT uređajem

Operater ne može utjecati na algoritam računala CT uređaja, pa je najvažnije pravilno odabrati parametre snimanja kako bi se dobili najbolji rezultati. Količina elektrona u snopu ovisi o jakosti struje koja prolazi kroz katodu, a energija elektrona ovisi o razlici napona. Povećavanjem napona povećava se penetracijska snaga x-zrake, odnosno povećava se broj fotona koji prođu kroz uzorak čime slika postaje svjetlija. Minimalni napon koji se mora postaviti osigurava da x-zraka prođe i kroz najdeblji i najgušći dio uzorka, ali povećanje napona smanjuje kontrast između manje gustih dijelova materijala iz pozadine, pa se na tim mjestima smanjuje kvaliteta slike. Povećanjem jakosti struje povećavamo točnost slike jer detektor zabilježi više fotona, ali je onda nužno povećati i površinu metala kojeg elektroni pogađaju kako se metal ne bi rastalio zbog velike količine topline koja se pri tom razvija. Time se smanjuje rezolucija slike jer ona ovisi o veličini izvora x-zrake. O toplinskom kapacitetu metala i njegovoj disipaciji topline te izvedbama hlađenja pojedinog CT uređaja ovisi odnos jakosti struje i veličine izvora x-zraka. Rezoluciju slike se može povećati i približavanjem uzorka izvoru x-zraka, ali to je ograničeno veličinom samog uzorka, budući da cjelokupna

slika uzorka mora biti vidljiva iz svih kuteva snimanja. Zbog načina stvaranja, x-zrake u CT uređaju su polikromatske, odnosno sastoje se od fotona različitih energija. Fotoni s manjom energijom teže prolaze kroz materijal, a fotoni s većom energijom lakše prolaze, no detektor u CT uređaju ne razlikuje energije fotona i sve ih prikazuje jednako. Zbog neujednačenosti tih energija uređaj nam može prikazati artefakte, odnosno nešto što u stvarnosti ne postoji, a to smanjuje kvalitetu slike. Tu pojavu se nastoji izbjeći filtriranjem x-zraka prije no što dođu do ispitnog materijala, najčešće umetanjem nekog materijala u obliku ravne ploče određene debljine kao filtra koji apsorbira fotone s manjom energijom što dovodi do energetskog ujednačenja x-zrake. Također, kada se snima veliki cilindrični objekt, može doći do velike razlike u intenzitetu fotona koji prođu kroz centralni dio uzorka zbog njegove debljine i onih koji prolaze bliže rubu uzorka. Kako bi se to izbjeglo, filter može biti i oblika prikazanog na slici 3.9, čime se smanjuje intenzivnost fotona koji dolaze do rubova uzorka te se tako stvara realnija slika. Naravno, stavljanjem filtra se smanjuje ukupni broj fotona koji dolaze do detektora, pa je zbog toga nužno povećati jakost struje, ekspoziciju ili broj projekcija. Veći broj projekcija i duža ekspozicija povećavaju kvalitetu slike, ali i povećavaju vrijeme snimanja [21].



Slika 3.9: Filtar za cilindrične objekte [21]

Prednosti CT uređaja pri karakterizaciji tehničkih materijala su:

- potpuno je nerazorna metoda ispitivanja,
- nema potrebe za pripremom uzorka i
- dobiva se trodimenzionalni prikaz materijala, čime se lakše predočava njegova struktura.

Nedostaci CT uređaja su:

- cijena samog uređaja je vrlo velika, posredno i pojedinačnog ispitivanja,
- potrebna je visoka stručnost pri upravljanju uređajem te
- točnost i kvaliteta karakterizacije uvelike ovisi o vremenu ispitivanja.

4 | Eksperimentalni dio

4.1. Metalografija

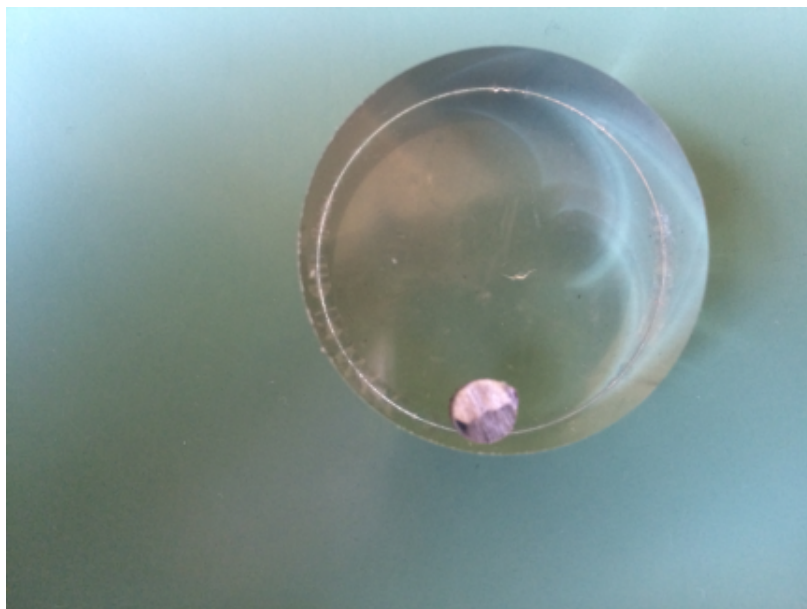
Metalografija odnosno materijalografija je metoda kojom se pomoću svjetlosnog ili elektronskog mikroskopa ispituje mikrostruktura materijala. Kako bi se materijal mogao ispitati na mikroskopu potrebna je priprema uzorka, koja se sastoji od:

- izrezivanja uzorka,
- ulijevanja u kalup,
- brušenja,
- poliranja i
- nagrivanja.

Metalografija TiMg kompozita je napravljena u Laboratoriju za materijalografiju unutar Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Izrezala su se dva uzorka, od kojih je jedan iskorišten za metalografiju, a drugi za računalnu tomografiju. Ulijevanje u polimernu masu se radi s ciljem zaštite i lakšeg rukovanja uzorkom. Na slici 4.1 se vidi uređaj za ulijevanje, a na slici 4.2 se vidi uzorak nakon ulijevanja. Uzorak je postavljen blizu ruba kalupa, kako bi se naknadnim brušenjem mogao vidjeti i uzdužni presjek uzorka.

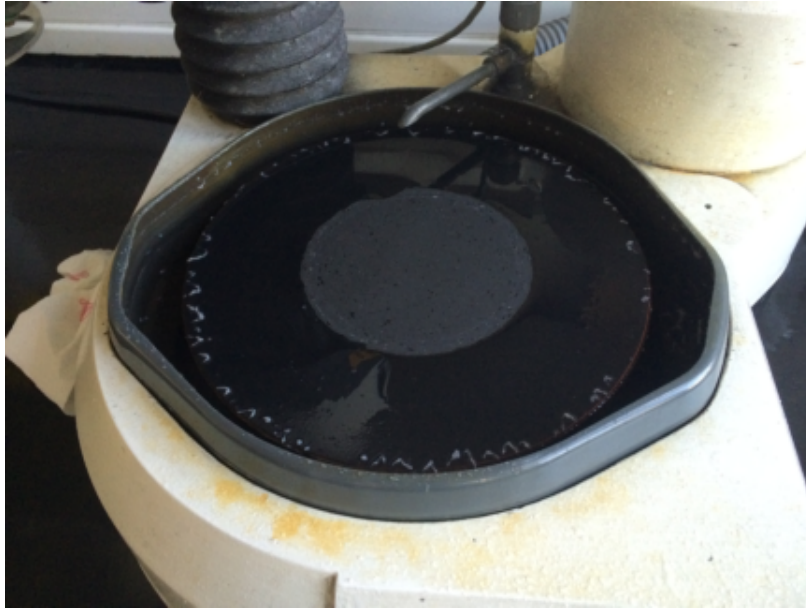


Slika 4.1: Uređaj za ulijevanje



Slika 4.2: Ukalupljeni uzorak

Brušenje je napravljeno na uređaju *Buehler: Phoenix Alpha*, kojeg se može vidjeti na slici 4.3. Izvedeno je u 5 faza, trajanje prve faze je bilo 3 minute, a ostalih faza dok se ne uklone tragovi nastali od prethodne faze te je svaka faza bila okrenuta za 90° u odnosu na prethodnu. Ostali parametri brušenja se vide u tablici 4.1.



Slika 4.3: Uređaj za brušenje

Tablica 4.1: Parametri po fazama brušenja

Faze brušenja	I	II	III	IV	V
Podloga	Brusni papir	Brusni papir	Brusni papir	Brusni papir	Brusni papir
Abraziv	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC
Oznaka granulacije papira	320	500	1000	2000	4000
Sredstvo hlađenja	-	-	-	-	-
Broj okretaja $[\text{min}^{-1}]$	300	300	300	300	300
Sila	ručno	ručno	ručno	ručno	ručno

Poslije brušenja uslijedilo je poliranje kako bi se dodatno pripremila površina za analizu. Izvedeno je na uređaju *Struers: DAP-V*, kojeg se vidi na slici 4.4. Poliranje je izvedeno u jednoj fazi, čiji se parametri vide u tablici 4.2.



Slika 4.4: Uređaj za poliranje

Tablica 4.2: Parametri poliranja

Faze poliranja	I
Podloga	<i>MD-Chem</i>
Abraziv i hlađenje	<i>OP-S NonDry</i>
Veličina abraziva [μm]	0,04
Broj okretaja [min^{-1}]	150
Sila [N]	30
Vrijeme [min]	5

Nakon poliranja, uzorak je nagrizen u otopini *Kroll's Reagent*, čiji je sastav 100 ml destilirane vode te 6 ml dušične kiseline - HNO_3 . Nagrizanje je trajalo 1 minutu, nakon toga se uzorak isprao u vodi čime je bio spreman za promatranje na mikroskopu. Analiza mikrostrukture je izvedena na svjetlosnom mikroskopu *Olympus GX51*, kojeg se vidi na slici 4.5.



Slika 4.5: Svjetlosni mikroskop

Na slici 4.6 se vidi poprečni presjek uzorka pod mikroskopom uz povećanje 100x, a slika 4.7 prikazuje uzdužni presjek uzorka uz povećanje 100x.



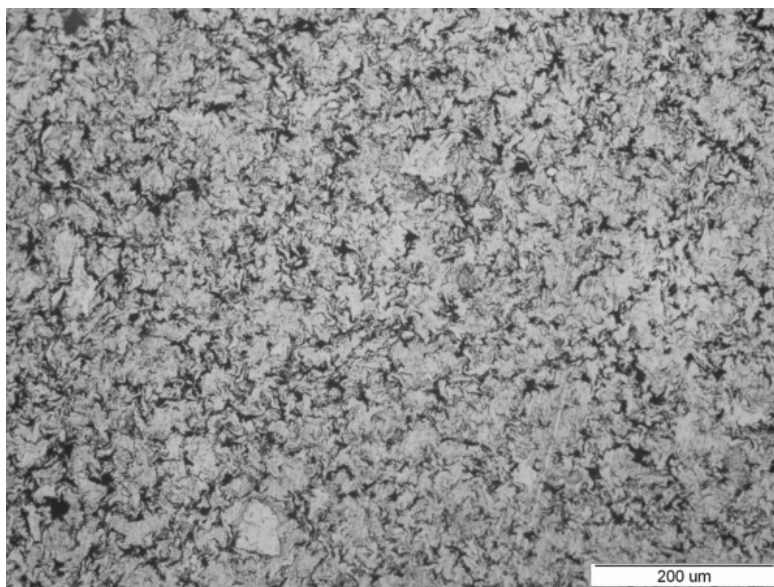
Slika 4.6: Poprečni presjek uzorka, uvećanje 100x



Slika 4.7: Uzdužni presjek uzorka, uvećanje 100x

Sa slika 4.6 i 4.7 se vidi da je magnezij, tamnije boje, ravnomjerno raspoređen u uzorku. Također, vidi se da je magnezij izdužen u uzdužnom presjeku, što je posljedica procesa proizvodnje, metodom hladne ekstruzije. Uzorak je također snimljen u poprečnom i uzdužnom

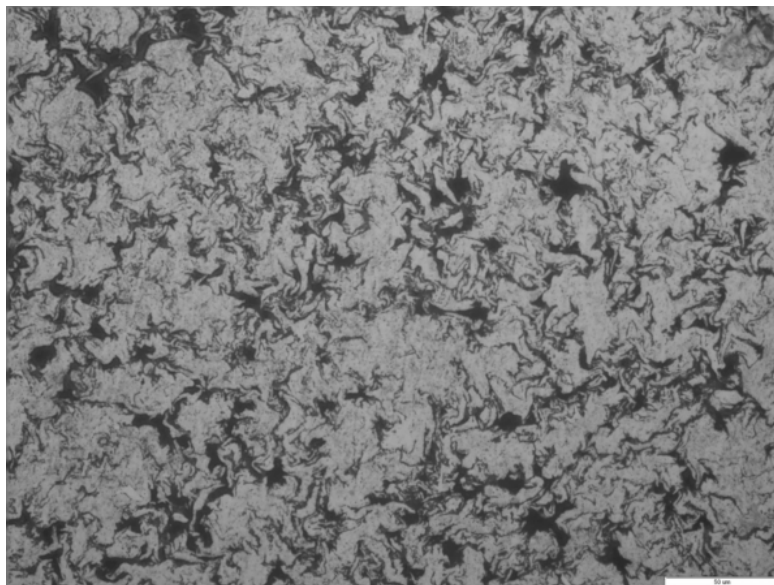
presjeku s uvećanjima 200x, 500x i 1000x, što prikazuju redom slike [4.8](#), [4.9](#), [4.10](#), [4.11](#), [4.12](#) i [4.13](#).



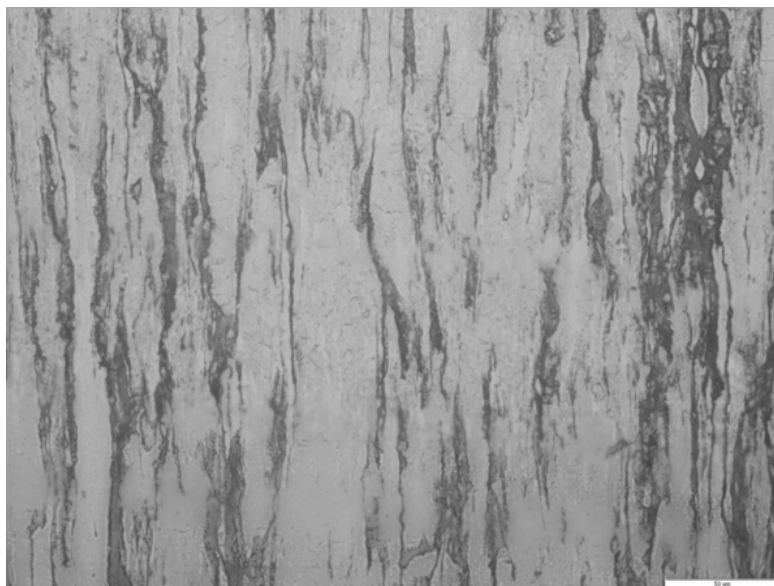
Slika 4.8: Poprečni presjek uzorka, uvećanje 200x



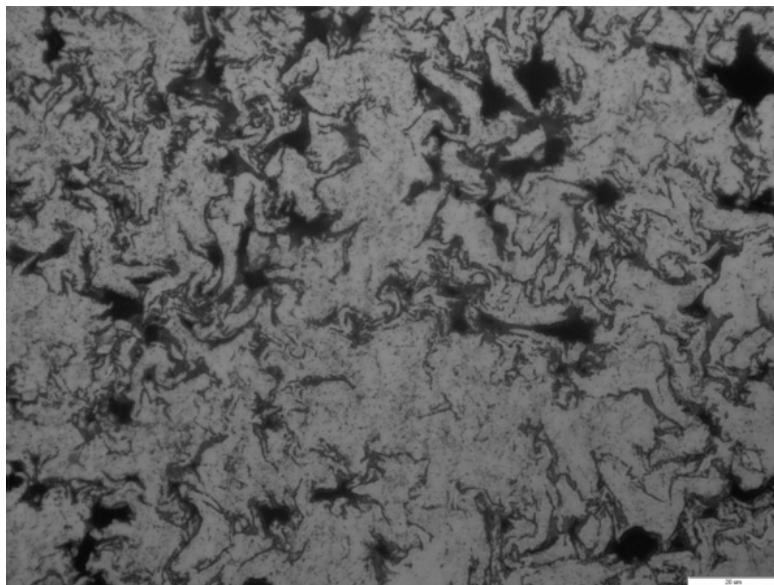
Slika 4.9: Uzdužni presjek uzorka, uvećanje 200x



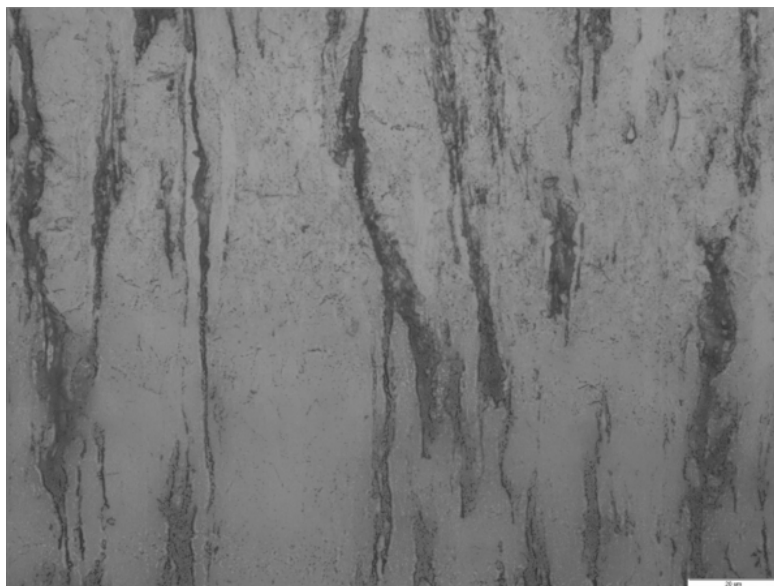
Slika 4.10: Poprečni presjek uzorka, uvećanje 500x



Slika 4.11: Uzdužni presjek uzorka, uvećanje 500x



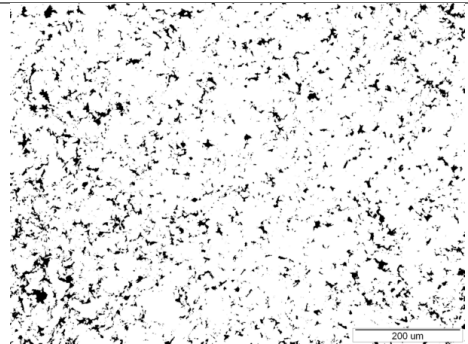
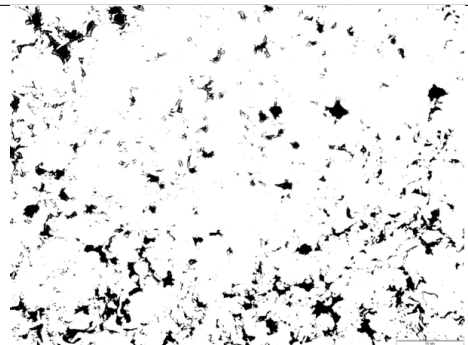

Slika 4.12: Poprečni presjek uzorka, uvećanje 1000x



Slika 4.13: Uzdužni presjek uzorka, uvećanje 1000x

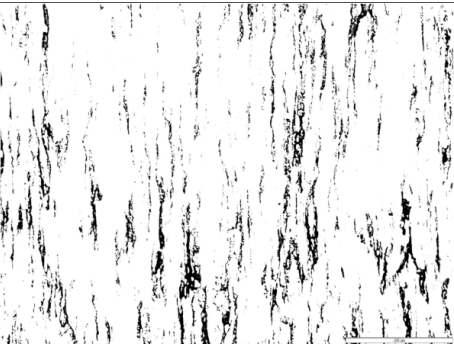
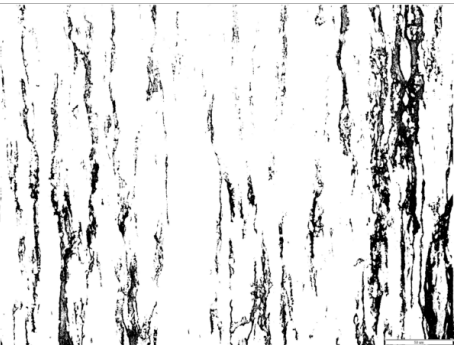
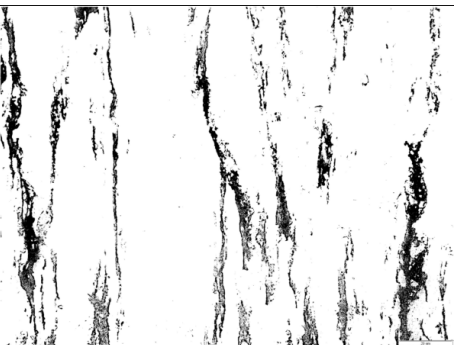
Kako bi se dobio udio magnezija u uzorku te kako bi se odredila veličina čestica magnezija, upotrebljen je program *ImageJ*. U tablici 4.3 su prikazani rezultati analize za poprečni presjek, udio magnezija u uzorku te prosječnu veličinu površine čestica magnezija.

Tablica 4.3: Rezultati obrađenih slika - poprečni presjek

Obradene slike	Povećanje	Udio magnezija u uzorku [%]	Prosječna površina čestica magnezija [μm^2]
	200x	8.2	17.7
	500x	7.6	13.4
	1000x	7.2	10.6

U tablici 4.4 su prikazani rezultati analize za uzdužni presjek, udio magnezija u uzorku te prosječnu duljinu čestica magnezija.

Tablica 4.4: Rezultati obrađenih slika - uzdužni presjek

Obrađene slike	Povećanje	Udio magnezija u uzorku [%]	Prosječna duljina čestica magnezija [μm]
	200x	7.4	145.6
	500x	10.5	156.8
	1000x	7.4	-

Pri uvećanju 1000x, nije mjerena duljina čestica magnezija jer su čestice dulje od veličine slike pri tom uvećanju.

Dobiveni rezultati se mogu uprosječiti tako da su rezultati za poprečni presjek:

- Udio magnezija u uzorku - 7.7 % i
- Prosječna površina čestica magnezija - $13.9 \mu\text{m}^2$.

Za uzdužni presjek su prosječni rezultati:

- Udio magnezija u uzorku - 8.4 % i
- Prosječna duljina čestica magnezija $151.2 \mu\text{m}$.

Ako bi se čestice magnezija aproksimirale kao cilindrične, njihov volumen bi bio umnožak površine i duljine, tako da bi prosječni volumen iznosio $2101.7 \mu\text{m}^3$.

4.2. Računalna tomografija

Računalna tomografija TiMg kompozita je napravljena u Nacionalnom laboratoriju za duljinu unutar Zavoda za kvalitetu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Priprema uzorka za računalnu tomografiju nije potrebna. Snimanje uzorka je izvedeno na CT uređaju *Nikon XT H 225*, kojeg se može vidjeti na slici 4.14. Parametri snimanja su prikazani u tablici 4.5.

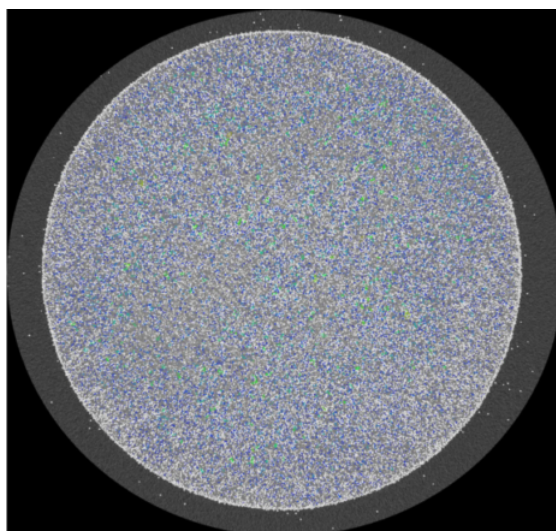


Slika 4.14: CT uređaj *Nikon XT H 225*

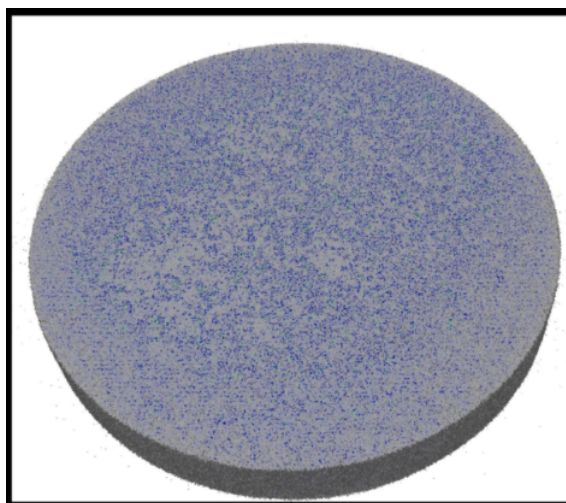
Tablica 4.5: Parametri snimanja CT uređajem

Jakost struje [μA]	90
Napon [kV]	160
Materijal filtra	Bakar
Debljina filtra [mm]	1
Broj projekcija	1000
Vrijeme ekspozicije [ms]	1000

Obrada podataka je napravljena u programu *VGStudio MAX 2.2*. Tlocrt uzorka je prikazan na slici 4.15, a trodimenzionalni prikaz se vidi na slici 4.16.



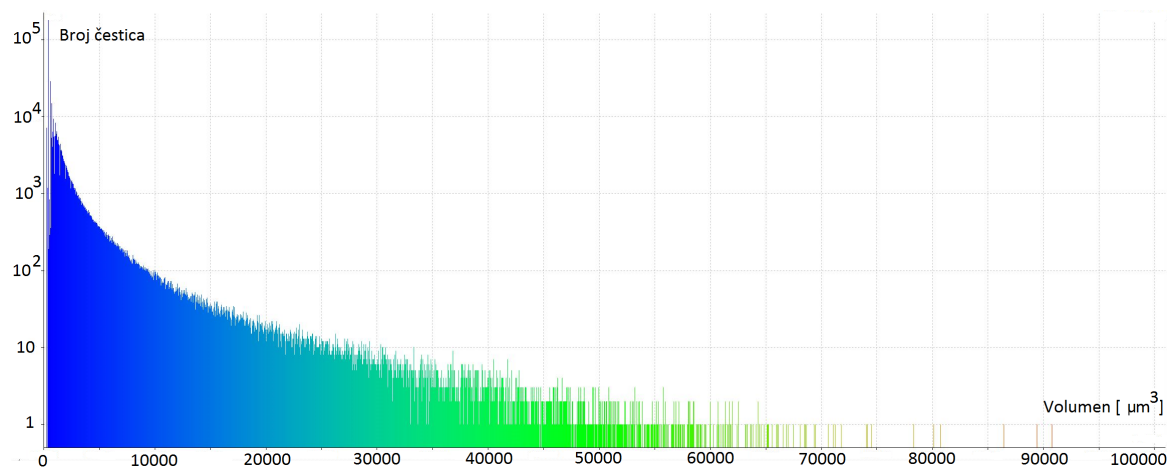
Slika 4.15: Tlocrt uzorka



Slika 4.16: Trodimenzionalni prikaz uzorka

Sa slika 4.15 i 4.16 se može vidjeti da je magnezij, prikazan plavom bojom, ravnomjerno raspoređen u uzorku te da nema aglomerata, odnosno većih nakupina magnezija u uzorku. Na slici 4.17 se vidi graf koji na apcisi prikazuje volumen čestica magnezija, a na ordinati broj čestica magnezija. Iz slike 4.17 se vidi da je najveći broj čestica vrlo malog volumena.

Ukupan broj čestica magnezija je 781 624, a njihov ukupni volumen je $1,784 \text{ mm}^3$. Prosječni



Slika 4.17: Odnos veličine čestica magnezija i njihove količine

volumen čestica je $2282.9 \mu\text{m}^3$. Udio magnezija u uzorku iznosi 9,92%.

5 Zaključak

Nakon provedene metalografske analize mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Magnezij je po čitavom uzorku raspoređen ravnomjerno.
- Utvrđena je usmjerena struktura u uzdužnom presjeku zbog procesa proizvodnje hladnom ekstruzijom.
- Udio magnezija u uzorku je od 7.2% do 10.5% , s prosjekom od 8.05%.
- Prosječni volumen čestica magnezija je $2101.7 \mu\text{m}^3$.

Provedenom analizom računalne tomografije može se zaključiti sljedeće:

- Moguće je razlučiti dvije prisutne faze u kompozitu, titan i magnezij.
- Također je utvrđen ravnomjieran raspored čestica magnezija.
- Udio magnezija u uzorku je 9.92%.
- Prosječni volumen čestica magnezija je $2282.9 \mu\text{m}^3$.

Razlika u rezultatima metalografske analize i analize računalnom tomografijom postoji. Toj razlici je doprinio niz faktora, u računalnoj tomografiji to su parametri snimanja CT uređajem koji se mogu mijenjati i optimizirati, a u metalografiji je to pojednostavljenje oblika čestica magnezija, pretpostavljen je oblik cilindra, a u pravilu su to vrlo nepravilni oblici. Ovaj eksperimentalni rad ipak dokazuje da se računalna tomografija može primijeniti u kvantitativnoj analizi mikrostrukture metalnih kompozita, no zbog cijene uređaja i vremena potrebnog za analizu i obradu rezultata, računalna tomografija kao primarna metoda bi se trebala koristiti samo u slučajevima kada je nužno nerazorno ispitivanje.

Literatura

- [1] Karl Ulrich Kainer. *Basics of Metal Matrix Composites*, 2006.
- [2] Franjo Kovačiček; Irena Žmak. *Metal matrix composites*, 2005.
- [3] R.H. Bossi; B.W. Knutson; J.L. Cline; R.J. Kruse; G.E. Georgeson. *X-ray computed tomography for the aircraft/aerospace industry*, 1991.
- [4] Danko Ćorić; Tomislav Filetin. *Materijali u zrakoplovstvu*, 2012.
- [5] Tomislav Filetin. *Predavanja iz kolegija: Napredne tehnologije materijala*, 2015.
- [6] <http://www.autoinspectproject.eu/project/index.jsp>.
- [7] <http://www.slideshare.net/spssil>.
- [8] C. G. McCracken. *Production of fine titanium powders via the Hydride-Dehydride (HDH) process*, 2008.
- [9] <http://www.ffri.hr/~zvonimir/StrojarskaTehnologijaII>.
- [10] Ljerka Slokar. *Metalurgija praha i sinter materijali*, 2015.
- [11] <http://www.pm-review.com/introduction-to-powder-metallurgy/sintering-in-the-powder-metallurgy-process/>.
- [12] <http://www.kobelco.co.jp/english/products/ip/technology/hip.html>.

- [13] <http://www.tms.org/pubs/journals/jom/0104/rawal-0104.html>.
- [14] <http://www.specmaterials.com/f16landingbrace.htm>.
- [15] Andrew Ramsey. *The Effect of Filtering X-rays in Computed Tomography*, 2012.
- [16] Lois E. Romans. *Computed Tomography for Tehnologists - A Comprehensive Text*, 2001.
- [17] <http://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/interaction-radiation-matter/interaction-gamma-radiation-matter/gamma-ray-attenuation/linear-attenuation-coefficient/>.
- [18] <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>.
- [19] Andrew Ramsey. *Getting the most from your CT system*, 2011.
- [20] <http://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/amd-1010-uses-advances-3d-scanning/>.
- [21] Andrew Ramsey. *How to get the most out of your X-Tek CT system*, 2009.